Podstawy teorii pola elektromagnetycznego / Zygmunt Piątek, Paweł Jabłoński. – wyd. 2 - 1 dodr. (PWN). – Warszawa, cop. 2017

Spis treści

Przedmowa do wydania drugiego 11

Konwencje i ważniejsze oznaczenia 13

1. Rachunek i analiza wektorowa 17
1.1. Wielkości skalarne i wektorowe 17
1.2. Układy współrzędnych 20
1.2.1. Układ współrzędnych kartezjańskich (prostokątnych) 20
1.2.2. Układ współrzędnych walcowych (cylindrycznych) 21
1.2.3. Układ współrzędnych kulistych (sferycznych) 23
1.2.4. Układ współrzędnych biegunowych (kołowych) 25
1.3. Algebraiczne operacje wektorowe 26
1.3.1. Dodawanie i odejmowanie wektorów 26
1.3.2. Iloczyn skalarny wektorów 27
1.3.3. Iloczyn wektorowy wektorów 30
1.3.4. Iloczyn mieszany 32
1.4. Operator nabla 33
1.5. Operator Laplace'a (laplasjan) 33
1.6. Różniczkowanie pól skalarnych i wektorowych względem czasu 34
1.7. Różniczkowanie wektora wodzącego 35
1.8. Delta Diraca 37
1.9. Pochodna kierunkowa i gradient pola skalarnego 38
1.9.1. Pochodna kierunkowa 38
1.9.2. Gradient 39
1.10. Strumień i dywergencja pola wektorowego 42
1.10.1. Strumień pola wektorowego 42
1.10.2. Dywergencja 43
1.10.3. Twierdzenie Gaussa-Ostrogradskiego 46
1.11. Cyrkulacja i rotacja pola wektorowego 48
1.11.1. Całka liniowa i cyrkulacja pola wektorowego 48
1.11.2. Rotacja 49
1.11.3. Twierdzenie Stokesa 53
1.12. Potencjały 54
1.12.1. Potencjał skalarny 54
1.12.2. Potencjał wektorowy 57

2. Pole elektrostatyczne 59
2.1. Ładunki elektryczne 59

2.2. Prawo Coulomba 61
2.3. Natężenie pola elektrycznego 62
2.4. Potencjał i napięcie elektryczne 69
2.5. Dielektryki. Polaryzacja i indukcja elektryczna 77
2.5.1. Zjawisko polaryzacji elektrycznej 77
2.5.2. Wektor polaryzacji 78
2.5.3. Związek polaryzacji z budową materii i jej właściwościami elektrycznymi 80
2.5.4. Wektor indukcji elektrycznej 80
2.5.5. Prawo Gaussa 82
2.5.6. Wytrzymałość elektryczna dielektryków 85
2.6. Pole elektrostatyczne w przewodnikach i w ich otoczeniu 86
2.6.1. Pole elektryczne przewodnika w równowadze elektrycznej 86
2.6.2. Przewodnik w polu elektrycznym 89
2.7. Pole elektryczne na granicy nieciągłości materiałowej 95
2.8. Równania pola elektrostatycznego 100
2.9. Pojemność elektryczna. Kondensatory 103
2.10. Energia pola elektrycznego 106
2.10.1. Energia układu ładunków punktowych 107
2.10.2. Energia ciągłego rozkładu ładunków 109
2.10.3. Energia naładowanego kondensatora 109
2.10.4. Postać lokalna energii pola elektrycznego 111
2.11. Obliczanie pól elektrostatycznych 112

3. Pole przepływowe 114
3.1. Prąd elektryczny 114
3.2. Prąd przewodzenia. Prawo Ohma w postaci różniczkowej 117
3.3. Prąd przesunięcia 120
3.4. Równanie ciągłości prądu 122
3.5. Równania pola przepływowego 124
3.6. Pole przepływowe na granicy nieciągłości materiałowej 126
3.7. Rezystancja 130
3.8. Uziomy 133
3.9. Straty mocy. Prawo Joule'a-Lenza 134
3.10. Źródło napięcia stałego 137
3.11. Prawa Kirchhoffa 139

4. Pole magnetostatyczne 142
4.1. Prawo Biota-Savarta 142
4.2. Oddziaływanie pola magnetycznego na ładunki 149
4.2.1. Siła magnetyczna 149
4.2.2. Siła działająca na przewód z prądem elektrycznym 150
4.3. Oddziaływanie pola magnetycznego z materią 152
4.3.1. Zjawisko magnetyzacji 152
4.3.2. Wektor magnetyzacji (namagnesowania) 153

4.3.3. Wektor natężenia pola magnetycznego 155
4.3.4. Magnetyczne właściwości materii 157
4.4. Prawo przepływu 162
4.5. Strumień indukcji magnetycznej 167
4.6. Równania i potencjały pola magnetostatycznego 169
4.6.1. Równania pola magnetostatycznego 169
4.6.2. Skalarny potencjał magnetyczny 169
4.6.3. Wektorowy potencjał magnetyczny 171
4.7. Pole magnetyczne na granicy nieciągłości materiałowej 176
4.8. Indukcyjność własna i wzajemna obwodów 182
4.8.1. Współczynnik indukcyjności własnej 182
4.8.2. Współczynnik indukcyjności wzajemnej 187
4.8.3. Obwody sprzężone magnetycznie 193
4.9. Energia pola magnetycznego 194
4.10. Podsumowanie 199
4.10.1. Obliczanie pola magnetostatycznego 199
4.10.2. Magnetostatyka a elektrostatyka - podobieństwa i różnice 199

5. Indukcja elektromagnetyczna 201
5.1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej 201
5.2. Zjawisko indukcji własnej i wzajemnej 208
5.3. Wnioski z prawa Faradaya 211
5.3.1. Różniczkowa postać prawa Faradaya 211
5.3.2. Dywergencja indukcji pola magnetycznego 212

6. Pole elektromagnetyczne 213
6.1. Równania Maxwella 213
6.2. Warunki brzegowe 218
6.3. Moc pola elektromagnetycznego. Twierdzenie Poyntinga 218
6.4. Falowy charakter pola elektromagnetycznego 223
6.4.1. Równanie falowe dla pola magnetycznego 223
6.4.2. Równanie falowe dla pola elektrycznego 224
6.4.3. Przypadki szczególne 226
6.4.4. Równanie dla prądu przewodzenia 226
6.5. Potencjały elektrodynamiczne 227
6.5.1. Określenie potencjałów 227
6.5.2. Cechowanie potencjałów 228
6.5.3. Równanie dla potencjału wektorowego 228
6.5.4. Równanie dla potencjału skalarnego 229
6.5.5. Równania dla potencjałów w dielektryku idealnym 229
6.5.6. Potencjały opóźnione 230

7. Harmoniczne pole elektromagnetyczne 231
7.1. Zespolona wartość skuteczna 231
7.2. Równania Maxwella w postaci zespolonej 234

7.3. Zależności energetyczne 234
7.3.1. Gęstość mocy związanej z przepływem prądu 235
7.3.2. Gęstość mocy i energii pola elektrycznego 236
7.3.3. Gęstość mocy i energii pola magnetycznego 237
7.3.4. Zespolony wektor Poyntinga 238
7.3.5. Twierdzenie Poyntinga 238
7.3.6. Moc pozorna, czynna i bierna w układzie niezawierającym źródeł 239
7.3.7. Straty mocy w dielektryku rzeczywistym 240
7.3.8. Zespolona przenikalność elektryczna 242
7.3.9. Zespolona przenikalność magnetyczna 243
7.4. Równania falowe w postaci zespolonej 243
7.5. Zespolone potencjały elektrodynamiczne 245
7.6. Promieniowanie 246
7.6.1. Potencjał wektorowy wytwarzany przez przewodnik liniowy z prądem 247
7.6.2. Podstawowe założenia upraszczające 248
7.6.3. Dipol Hertza - promieniowanie dipolowe elektryczne 249
7.6.4. Promieniowanie dipolowe magnetyczne 254
7.6.5. Moc i rezystancja promieniowania 257
7.6.6. Ogólna antena liniowa 258

8. Wolnozmienne pole harmoniczne 261
8.1. Przybliżenie quasi-statyczne 261
8.2. Indukcja elektromagnetyczna w przewodniku nieruchomym 262
8.3. Prądy wirowe w rozległej płycie 264
8.4. Zjawisko naskórkowości 269
8.4.1. Zjawisko naskórkowości w rozległej płycie 269
8.4.2. Zjawisko naskórkowości w przewodzie walcowym 273
8.5. Zjawisko zbliżenia w dwóch równoległych płytach 277
8.6. Modelowanie obwodowe układów polowych 282
8.6.1. Impedancja własna przewodu 282
8.6.2. Impedancja własna i wzajemna obwodów sprzężonych magnetycznie 285

9. Płaska fala elektromagnetyczna 289
9.1. Płaska fala elektromagnetyczna w dielektryku idealnym 289
9.2. Harmoniczna fala płaska 294
9.2.1. Harmoniczna fala płaska w dielektryku bezstratnym 298
9.2.2. Harmoniczna fala płaska w środowisku dobrze przewodzącym 300
9.2.3. Polaryzacja fali 303
9.2.4. Parametry falowe środowiska 307
9.2.5. Równania Maxwella dla fali płaskiej 309
9.3. Harmoniczna fala płaska na granicy środowisk - padanie prostopadłe 311
9.3.1. Zależności ogólne 311
9.3.2. Padanie prostopadłe na granicę dielektryków bezstratnych 313

9.3.3. Padanie prostopadłe w układzie dielektryk bezstratny - przewodnik 315
9.3.4. Padanie prostopadłe w układzie dielektryk bezstratny - przewodnik idealny 317
9.4. Harmoniczna fala płaska na granicy środowisk - padanie ukośne 318
9.4.1. Wnioski z prawa Snella 320
9.4.2. Polaryzacja prostopadła 321
9.4.3. Polaryzacja równoległa 327

10. Linie przesyłowe. Linia długa 331
10.1. Zagadnienia wstępne 331
10.1.1. Klasyfikacja fal elektromagnetycznych 331
10.1.2. Klasyfikacja prowadnic EM 331
10.1.3. Równania pola elektromagnetycznego dla fali prowadzonej 332
10.2. Fale TEM w liniach przesyłowych 334
10.2.1. Zależności ogólne 334
10.2.2. Kabel koncentryczny jako linia przesyłowa TEM 336
10.3. Linia długa 339
10.3.1. Schemat zastępczy i równania linii dwuprzewodowej 339
10.3.2. Linia jednorodna przy wymuszeniu sinusoidalnym 341
10.3.3. Parametry jednostkowe linii długiej 347
10.3.4. Parametry charakterystyczne (falowe) linii długiej 351
10.3.5. Linia nieodkształcająca 354
10.3.6. Impedancja wejściowa linii 356
10.3.7. Szczególne stany pracy linii długiej 358
10.3.8. Moc i sprawność linii 360
10.4. Linia długa bezstratna 361
10.4.1. Parametry i równania linii bezstratnej 361
10.4.2. Prąd i napięcie 363
10.4.3. Stan dopasowania falowego 364
10.4.4. Stan jałowy 366
10.4.5. Stan zwarcia 368
10.4.6. Linia bezstratna obciążona rezystancją 370
10.4.7. Linia bezstratna obciążona idealną reaktancją 373
10.4.8. Bezstratna linia długa obciążona dowolną impedancją 375
10.4.9. Impedancja wejściowa 378
10.4.10. Moc w linii bezstratnej 379
10.4.11. Linia bezstratna jako transformator dopasowujący 381
10.4.12. Wykres Smitha 383

11. Falowody rurowe o ściankach przewodzących 387
11.1. Zagadnienia wstępne 387
11.2. Falowód o przekroju prostokątnym 389
11.2.1. Fala typu H 392
11.2.2. Fala typu E 396
11.3. Falowód o przekroju kołowym 399

11.3.1. Fala typu H 400
11.3.2. Fala typu E 403
11.4. Ogólne właściwości falowodów o ściankach idealnie przewodzących 405
11.5. Falowody stratne 406

12. Światłowody 410
12.1. Falowody dielektryczne 410
12.2. Światłowód płaski 411
12.2.1. Fala typu H 413
12.2.2. Fala typu E 416
12.3. Światłowód włóknisty o przekroju kołowym 417
12.3.1. Mody typu H 419
12.3.2. Mody typu E 421
12.3.3. Mody mieszane 422
12.3.4. Światłowody o słabym prowadzeniu. Mody LP 426

13. Rezonatory 431
13.1. Rezonatory wnękowe 431
13.2. Kabel koncentryczny jako rezonator 432
13.3. Tory przesyłowe jako rezonatory 437
13.4. Rezonator prostopadłościenny o ściankach przewodzących 438
13.5. Rezonator cylindryczny o ściankach przewodzących 441
13.6. Ogólne zależności czasowe i przestrzenne 447
13.7. Dobroć rezonatora 450

Bibliografia 455

Skorowidz 458

oprac. BPK